

磁気研磨法の加工機構の解明と装置の開発に関する研究

著者	進村 武男
号	938
発行年	1987
URL	http://hdl.handle.net/10097/11887

氏 名	しん 進 村 武 男
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 62 年 12 月 9 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 45 年 3 月 金沢大学大学院工学研究科精密工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	磁気研磨法の加工機構の解明と装置の開発に関する 研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 松井 正己 東北大学教授 渡邊 眞 東北大学教授 鎌田 治 東北大学教授 中鉢 憲賢

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

磁気研磨法 (Magnetic Abrasive Finishing Process) とは、強磁性体 (鉄) と酸化アルミニウム等の研磨材から構成される粒状の磁性研磨材を用い、磁界の作用を利用して部品の表面仕上げとエッジ仕上げを行う新しい加工法のことをいう。円筒外面の磁気研磨法を例にとってその概要を説明する。図 1 の N-S 磁極間に磁性研磨材粒子を充填すると、磁力線に沿って粒子がブラシ状に整列する (磁気研磨ブラシと呼ぶ)。この磁界中に工作物を挿入し、回転と軸方向の振動運動を与えると、磁気研磨ブラシによ

って工作物表面が加工される。すなわち、工作物が磁性体であるとき、磁化された工作物表面とブラシ先端粒子との間に磁力が作用し、先端粒子は力 P_x で工作物表面に押しつけられる。一方、 P_x で押しつけられた粒子は、工作物の回転によって接線研磨抵抗 P_y を受けるが、磁極と工作

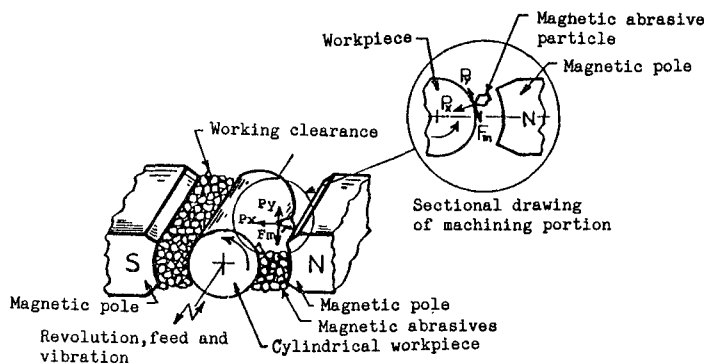


図 1 円筒外面の磁気研磨法

物間の不均一集中磁界分布に基づく磁力 F_m を受けて加工域外への移動・流出が防止され、加工域に保持されながら工作物表面を加工する。加工前後の工作物外観写真の一例を図2に示す。

磁気研磨法の特長を列举するとほぼ次のようになる。

- (1) 工作物表面と磁極との間に数 mm の間隙が許され、この間隙における

磁性研磨材は磁力保持されて加工に関与するため、円筒や平面形状部品はいうまでもなく、多少の形状的凹凸をもつ面や曲面、さらに、磁極形状を工作物形状に大略あわせれば、複雑形状部品の研磨加工も可能である。

- (2) 比較的短時間に $0.1\ \mu\text{m}$ R_{max} オーダの精密加工面が得られる。
(3) コイルへの励磁電流を変化するだけで加工条件が設定・制御できる。
(4) 各種形状部品のエッジ仕上げが可能である。

磁気研磨法は、当初、部品のバリ取りに用いられ、その後、円筒研磨や平面研磨に適用されていた。今日、筆者らの研究によって、円筒部品や平面部品はいうまでもなく、内面や球面、複雑形状部品や金型自由曲面の研磨加工、各種形状部品のエッジ仕上げ、さらにセラミックスのような硬ぜい材料の研磨加工にまで幅広く応用できることが判明してきた。しかしながら、筆者らが、系統的研究を開始するまでは極めて概略的なことしか分っておらず、加工特性や加工機構の詳細はもちろん、加工装置とその性能についても不明な点が多かった。そこで、本論文では、磁気研磨法の加工原理、加工装置の設計方法、加工特性、加工機構、形状精度、加工表面の性状などについて、それぞれ明らかにし、さらに各種部品への具体的な応用（工業的応用）に関して研究することを目的とした。

本研究成果を各章別にまとめると次のようになる。第2章では、円筒外面の磁気研磨法について、その加工原理、研磨圧力の発生機構、磁性研磨材に作用する磁力について明らかにした。第3章では、磁気研磨加工装置の設計の基礎となる磁気回路の計算法について述べ、磁気誘導装置に関する基本的事項を明らかにした。第4章では、研磨量と表面粗さに及ぼす加工諸因子の影響を実験的に明らかにするとともに、加工表面のSEM観察、残留応力と加工変質層深さの測定を行なった。また、セラミックスの磁気研磨特性およびエッジ仕上げ特性も明らかにした。第5章では、磁気研磨の仕上げ特性に関する第4章の実験結果に解析的な考察を展開し、加工機構を吟味検討した。第6章では、磁気研磨法における工作物の形状精度（真円度および円筒度）の改善条件を解析的に明らかにし、これを実験によって確認した。第7章では、磁気研磨法の工業的応用に主眼をおいて、平面、内面、球面、曲面、円管内面などの表面研磨に磁気研磨法を具体的に应用する場合の装置開発とその研磨性能について詳述した。以上の結果、磁気研磨法は各種形状部品の表面研磨とエッジ仕上げに応用できる新しい加工法であることを明らかにした。

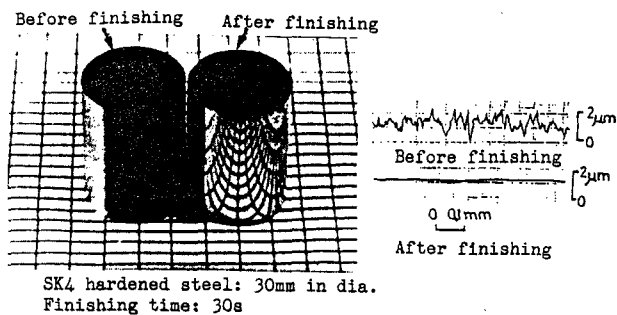


図2 加工前後の工作物外観写真と粗さプロフィール

第2章 磁気研磨法の加工原理

本章では、磁性研磨材、磁性研磨材に作用する磁力および加工に必要な研磨圧力の発生機構について述べている。図3に磁性研磨材のSEM写真を示す（鉄と粒径 $5\mu\text{m}$ の酸化アルミニウムを重量比4:1で混合し、高温（約 1300°C ）、高圧（約 5MPa ）、不活性ガス雰囲気中で焼結後、粉碎、整粒したもの）。

図4に加工域近傍の磁界分布（電界分布のシミュレーション結果）を示す。加工域外のA位置の磁性研磨材粒子には粒子の体積とその磁化率、磁界の強さ、磁界の変化率に比例する磁力 $\Delta F_x, \Delta F_y$ が作用し、合力 ΔF によって加工域に充填される。さて、磁界が作用する2つの物質の境界面には圧力が発生する。この関係式を用いて、磁性研磨材が工作物表面に作用させる圧力を求めた。磁性研磨材粒子を球形、粒子1個の鉄の容積率を w 、粒子群の充填が正方系配列としたとき、圧力は次式で表せることを示した〔B: 磁束密度, μ_0 : 真空の透磁率, μ_r : 鉄の比透磁率〕。

$$P = \frac{B^2}{4\mu_0} \times \frac{3\pi(\mu_r - 1)w}{3(2 + \mu_r) + \pi(\mu_r - 1)w} \quad \dots\dots\dots (1)$$

いま、炭素鋼(0.16% C)のB-H曲線より μ_r を求めて式(1)を計算し、 w をパラメータとして磁束密度Bと圧力Pの関係を示すと図5の実線が得られる。

圧力は磁束密度の増大とともに増大し、1.2 T付近で最大値を示す。鉄の含有容積率 w が減少すると圧力も低下する。図6の装置により、圧力を測定した結果を●印で示す。実験に用いた磁性研磨

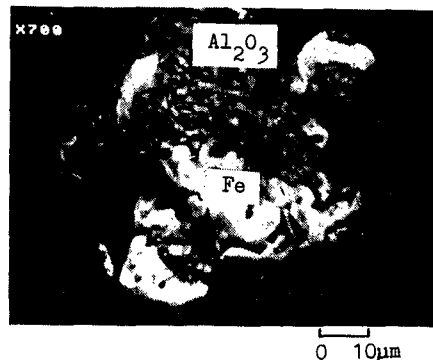


図3 磁性研磨材のSEM写真

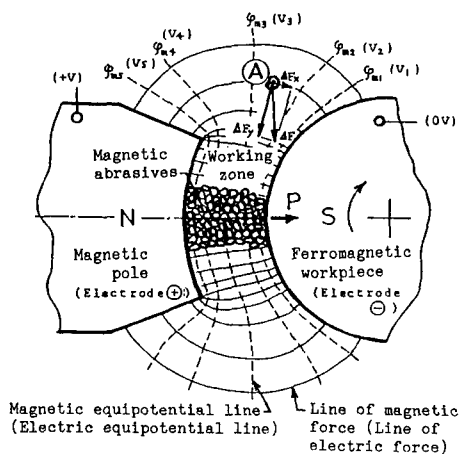


図4 加工域近傍の二次元磁界分布と磁性研磨材に作用する磁力

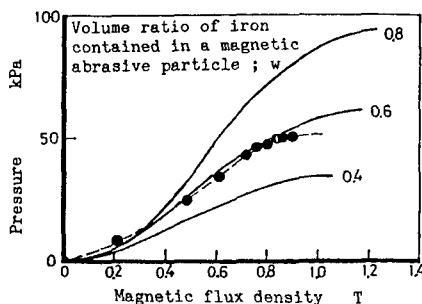


図5 磁束密度と圧力の関係

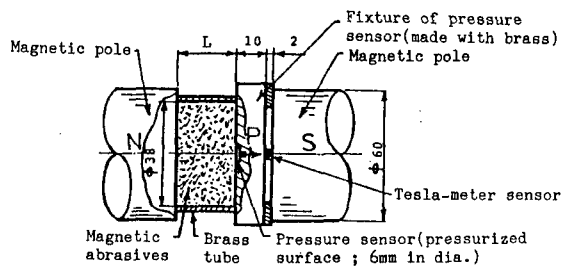


図6 圧力の測定方法

材は重量比で鉄80%、残部WA砥粒であるので $w \approx 0.6$ となり、従って、測定値と計算値はほぼ合っていると見える。

式(1)から、発生圧力は磁束密度 B 、鉄の含有容積率 w 、鉄の比透磁率 μ_r

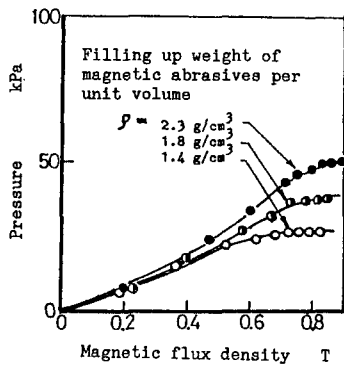


図7 磁束密度と圧力の関係

に関係し、磁性研磨材の粒径や加工間隙には無関係であることがわかった。このことを実験により確認した。

図6に示すように、磁性研磨材を黄銅製パイプ内に充填し、その充填密度 ρ をパラメータとして磁束密度と圧力の関係を求めた(図7)。磁束密度に対する発生圧力の変化は図5と類似しており、充填密度が小さくなる(w が小さくなる)と圧力も低下する。 ρ を一定とし、図6の間隙 L をパラメータとして、磁束密度と圧力の関係を求めた(図8)。圧力は L に無関係であることを確認できた。さらに、鋼球を用い、粒径をパラメータとして磁束密度と圧力の関係を求めた(図9)。圧力は粒径に無関係であることも確認できた。磁性研磨材に作用する磁力と式(1)は加工機構考案の基礎を与える。

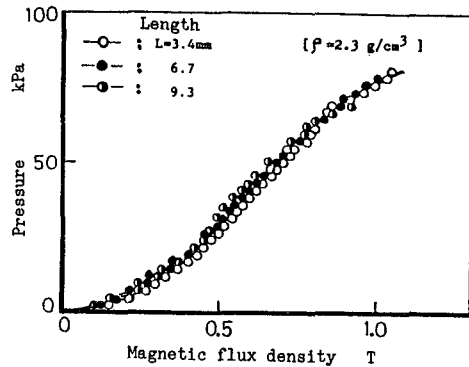


図8 磁束密度と圧力の関係

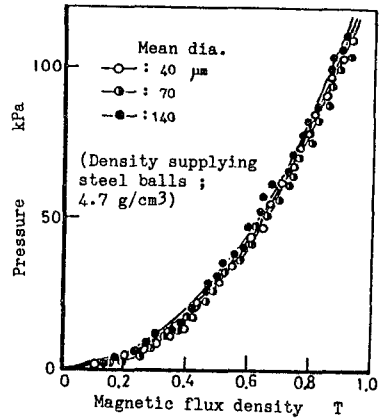


図9 磁束密度と圧力の関係

第3章 磁気研磨実験装置の設計

磁気研磨装置は大別して、磁場発生装置と工作物の回転・振動運動駆動装置とから構成される。本章では、磁場発生装置の基礎となる磁気回路の計算法について述べている。磁場発生源には電磁

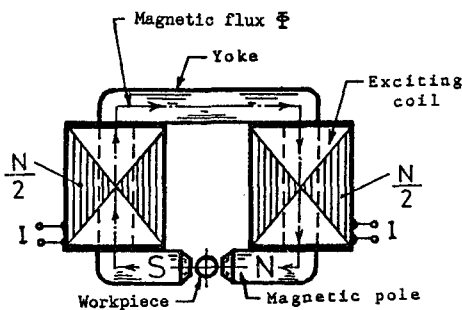


図10 磁気誘導回路

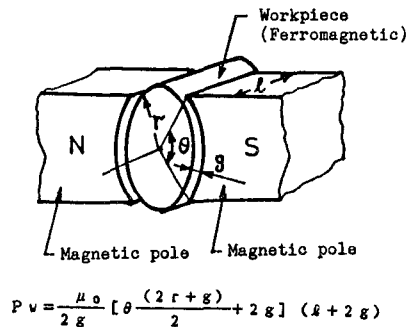


図11 空隙のパーミアンス P_w

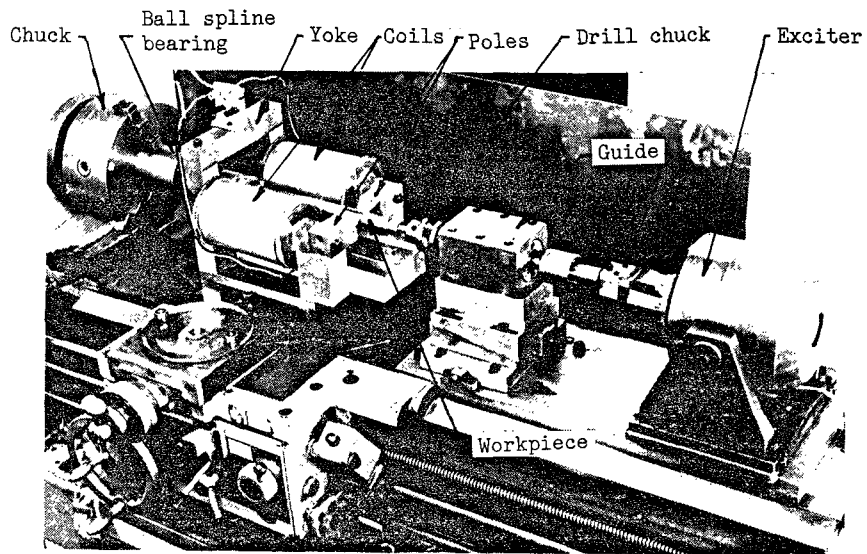


図12 実験装置外観

コイルが採用され、図10の模式図において、鉄心、ヨークに磁気飽和がなく、磁気抵抗 R_m の大部分は空隙によって生ずる。磁束 Φ は、 M をコイル線の巻数、 I を電流として、 $\Phi = (NI)/R_m$ で表される。 R_m の逆数（パーミアンス P_w ）は磁路仮定法によって求められ（図11）、磁束 Φ と加工域の磁束密度 B_w は次式で与えられる。

$$\left[\begin{array}{l} \Phi = P_w NI \\ B_w = \frac{P_w NI}{\theta \ell (r + g)} \end{array} \right] \dots\dots\dots (2)$$

鉄心、ヨークにおける磁束密度は式(2)の磁束 Φ を材料の断面積で除して求められ、この値が材料の飽和磁束密度を超えないように断面寸法を決めることになる（図12の装置では $40 \times 40 \text{ mm}$ ）。工作物寸法は直径 30 mm 、長さ 45 mm であるので、磁極高さを 20 mm 、磁極幅 ℓ を 40 mm 、加工間隙 g を 3 mm 、磁束密度 B_w を 1.4 T とすると、 $NI = 4.85 \times 10^3 [\text{A}]$ が得られる。線径 1.5 mm のネオマル線を使用し、電流密度 1.2 A/mm^2 とすれば電流値 1.7 A が得られるので励磁電流 1.5 A として、巻数 N を求めると、 $N = 3300 [\text{ターン}]$ を得る。実際には漏れ磁束があるので、これより多く巻く必要があり、本研究では 4000 ターン とした。試作した磁気研磨装置外観を図12に示す。旋盤を利用して、工作物に回転をあたえ、電磁加振機によって軸方向に振動運動を重ねし得るようにしたものである。図13に磁束密度と励磁電流の関係を示す。

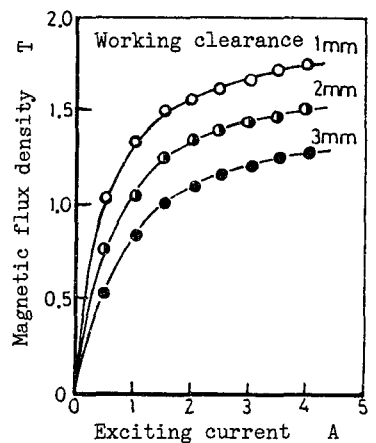


図13 励磁電流と磁束密度の関係

第4章 磁気研磨の仕上げ特性

本章では、研磨量と表面粗さに及ぼす加工諸因子の影響を実験的に明らかにしている。磁極に切欠きを設けてエッジの磁束集中効果を有効に利用した磁極（図14）が最適であることを明らかにした。

数分間の研磨時間では磁性研磨材の切れ味劣化と目づまり現象は生じにくく、研磨量は回転周速度にほぼ比例して増大すること（図15）、磁束密度の増大とともに研磨量は増加するが1.2 T付近で最大となり、その後は逆に減少する傾向を示すこと（図16：この現象は図5の研磨圧力の変化に対応させて説明できる）、磁性研磨材供給量を一定としたとき、加工間隙の増大に対して研磨量は逆に減少すること（図17：この現象は加工間隙の増大は磁性研磨材の充填密度を減少させ、研磨圧力を低下させること、磁極エッジ部における研磨効果を低下することにより説明できる）、工作物に振動を重畳させることによって研磨量が2～3倍に増大し、表面粗さの改善速度も向上すること（図18(a), (b)：振動重畳により単位時間あたり研磨距離の増大、切れ刃の切削方向の時間的変動（切削軌跡の交差）による切れ味向上、磁性研磨材の攪拌作用活発化（新しい切れ刃の関与）、目づまり防止効果などの諸効果によると考えられる）を明らかにすることができた。表面粗さは研磨量の傾向に対応して向上する。

磁性研磨材の種類がWA砥粒の粒径 d と、これを鉄で焼結した全体の粒子径 D によってモデル的に表されるとき（図19：A系、B系）、 D および d の違いの影響を調べた。図20に D が等しく、 d が異なる場合（A系）の結果を示す。研磨量に及ぼす d の影響度は小さく、表面粗さに及ぼす影響度は大きい。図21に d が等しく、 D が異なる場合（B系）の結果を示す。 D が研磨量に及ぼす影響は大きく、表面粗さに及ぼす影響も著しく大きいことがわかった。その他、加工液の効果も極めて大きいこともわかった。

X線回折法により約200 MPaの圧縮残留応力（SS 41材）が測定されること、微小硬度計法により $2.7\mu\text{m}$

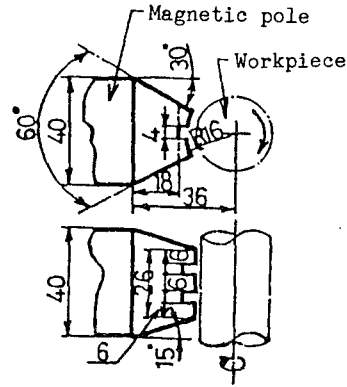


図14 磁極の形状および寸法

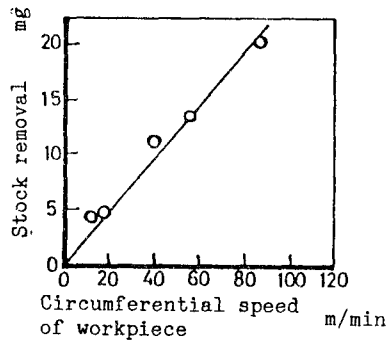


図15 工作物回転周速度の影響

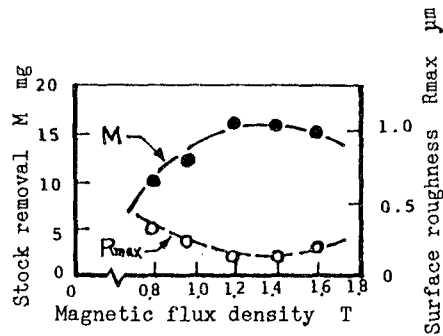


図16 磁束密度の影響

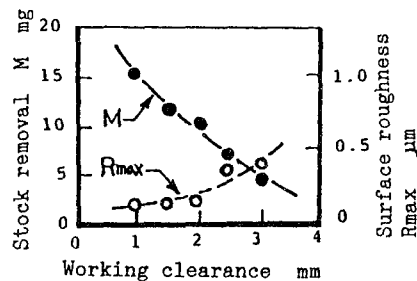


図17 加工間隙の影響

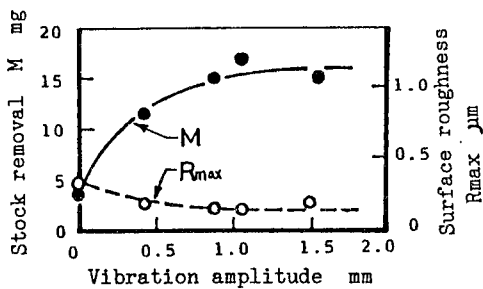
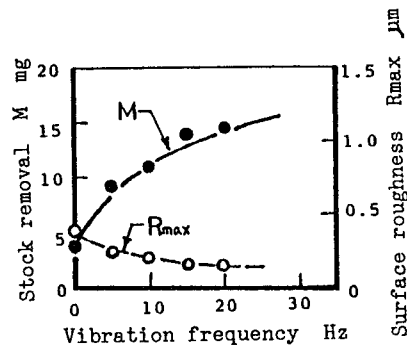
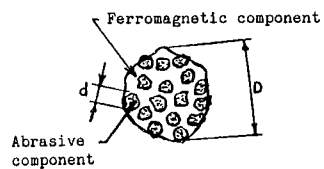


図18 工作物振動重量の影響

の加工変質層深さが測定されること、これらの値は超仕上加工における値に近いことを明らかにした。

ダイヤモンド磁性研磨材を用いればセラミックスの加工も可能なことがわかった。



	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	B-3
$D(\mu m)$	CONSTANT (105 μm)				100 under	130	205
$d(\mu m)$	5	10	28	40	CONSTANT (under 10 μm)		

図19 磁性研磨材のモデルと供試磁性研磨材

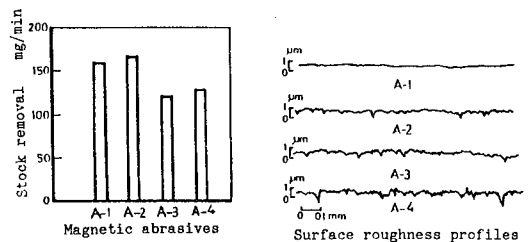


図20 研磨量と表面粗さに及ぼす磁性研磨材種類の影響

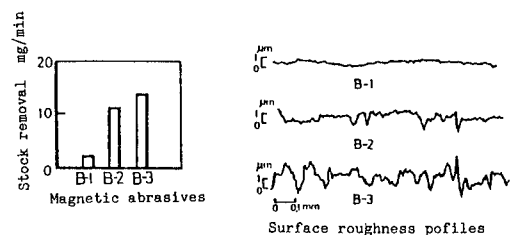


図21 研磨量と表面粗さに及ぼす磁性研磨材種類の影響

第 5 章 磁気研磨の仕上げ特性に関する考察

本章では，第 4 章において得られた実験結果，すなわち，研磨量と表面粗さに及ぼす加工諸因子の影響に対して解析的な考察を加えている。まず，磁気研磨ブラシは固定砥粒と異なり，ブラシ先端に研磨抵抗を受けると変形したり，加工域外へ移動・流出する場合のあることを指摘した。この現象を考慮するために，実際の研磨圧力は第 2 章で求めた静的圧力の ξ 倍になると仮定した。鋼球を用いたモデル実験と磁力計算の関係式とにより ξ を評価した結果，磁束密度，磁性研磨材の粒径および磁気研磨ブラシの長さとの間に

表 1 磁束密度，磁性研磨材の粒径，磁気研磨ブラシの長さとの関係

factors		ξ value
magnetic flux density	increase	increase
	decrease	decrease
diameter of magnetic abrasive particle	increase	increase
	decrease	decrease
length of magnetic abrasive brush [working clearance]	increase	decrease
	decrease	increase

は表 1 の関係が成立することを明らかにできた。この ξ を導入して研磨量と表面粗さに関する解析的考察を展開した。

磁性研磨材粒子が正方形配列をもち，砥粒切れ刃の切削量は超仕上量の理論式を用いて表されるとして解析を進めた結果，砥粒切れ刃の切削軌跡長を L_0 ，工作物のピッカース硬さを HV とし，円すい形切れ刃と球形切れ刃の場合を一緒にして示せば，研磨量 M は次式で表されることがわかった。ここに，P は第 2 章において誘導した圧力であり，式(1)で表される。

$$M \propto L_0 \cdot HV^{-(1-1.5)} \xi^{(1-1.5)} D^{(0-1)} P^{(1-1.5)} \dots\dots\dots (3)$$

研磨量は加工距離 L_0 が大きいほど，工作物硬さ HV が小さいほど，磁性研磨材の粒径 D が大きくなるほど増大する。しかし，磁性研磨材に含まれる砥粒の粒径 d には無関係である。加工間隙は ξ の値として関係し，加工間隙が小さくなると ξ は大きくなり研磨量は増大する。磁束密度 B については，B の増加とともに圧力 P も大きくなり（図 5），また，磁束密度が大きくなると ξ も大きくなる。従って，磁束密度が増加すると研磨量も増大することがわかった。これらの事象は第 4 章において述べた実験結果に一致する。

次に，砥粒切れ刃の圧痕深さで表面粗さ h を定義し，この場合も超仕上面粗さの理論式が適用できると仮定して解析を進めた。円すい形切れ刃と球形切れ刃を一緒にして示せば，

$$h \propto d \cdot D^{(1-2)} HV^{-(0.5-1)} \xi^{(0.5-1)} P^{(0.5-1)} \dots\dots\dots (4)$$

表面粗さは砥粒径 d が大きいほど，磁性研磨材の粒子径 D が大きいほど，工作物硬さ HV が小さいほど，加工間隙が小さいほど粗くなることがわかった。これらの事象は第 4 章において述べた実験結果に一致する。

第6章 磁気研磨法による形状精度の改善

本章では、工作物の真円度と円筒度の改善条件を解析的に明らかにし、これを実験によって確認した結果について述べている。第1章図1の断面を示す図22において、工作物の真円度曲線 ΔR_0 、工作物回転軸の振れ ΔS_0 が図示の式でフーリエ級数表示できるとき、A点の工作物表面の振れ ϵ は両者の和に工作物取付け時の偏心量 $A_1 \cos(\theta + \psi_1)$ を加えたものに等しい。加工度は ϵ に比例し、工作物1回転毎に真円度曲線が変化するものとして真円化過程の解析を進め、計算機シミュレーションも含めて検討した結果、 $m/n' \neq$ 正整数のとき、支持系の変動項 ΔS_0 および工作物本来の真円度項 ΔR_0 を消滅させ得ることを明らかにできた。このとき工作物の真円度 $\Delta R_\infty(\theta)$ は、

$$\Delta R_\infty(\theta) = -A_1 \cos(\theta + \psi_1) \quad \dots\dots\dots (5)$$

と表され、成円条件は $A_1=0$ とすることであることを明らかにした。旋盤に四つ爪チャックを取付け、工作物の偏心量を $0.3 \mu\text{m}$ におさえて確認実験した結果(図23)、円筒研削後の真円度 $2.6 \mu\text{m}$ を $0.6 \mu\text{m}$ にまで改善できた。

次に、図24に示す磁気研磨法の模式図において、磁極の配置のみに誤差がある場合の円筒度への影響について検討した。基本的な考え方は真円度の場合と同じであり、工作物の半径減少の変化量は加工間隙の変化量に比例するとし、工作物1回転毎について計算し、これを集積して円筒度への影響を調べた。その結果、工作物の円筒度 $\Delta R'_\infty$ は、

$$\Delta R'_\infty = |(r_1 - r_2)| x_m \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表され、円筒度改善条件は $r_1=r_2$ とすることであることがわかった。確認実験によって、円筒度 $7 \mu\text{m}$ を加工時間5minで $3 \mu\text{m}$ に改善できた。

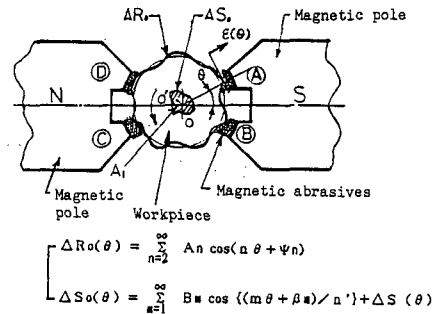


図22 円筒外面磁気研磨法の二次元表示

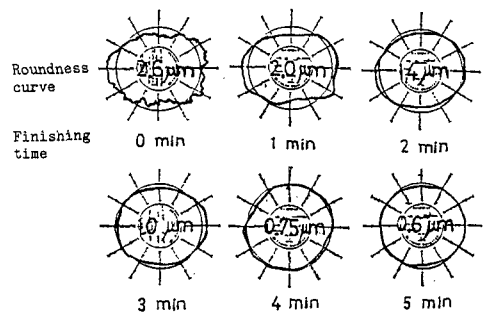


図23 真円度と研磨時間の関係

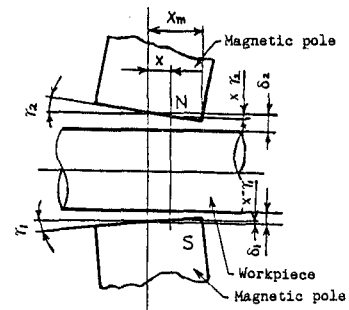


図24 磁極と工作物の相対位置関係

第7章 磁気研磨法の工業的応用

本章では、磁気研磨法の工業的応用に主眼をおいて、次の各項目に関して詳述している。

- (1) 平面の磁気研磨法とその加工装置の開発
- (2) 回転磁界を利用した磁気研磨法とその加工装置の開発
- (3) スピンドルフィニッシュ方式磁気研磨法とその加工装置の開発
- (4) 回転磁極による内面および球面の磁気研磨法とその加工装置の開発
- (5) 曲面（球面および自由曲面）の磁気研磨法とその加工装置の開発
- (6) 非磁性薄肉円管内面の磁気研磨法とその加工装置の開発

代表的なものについてその概略を述べる。

[1] 回転磁界を利用した高能率磁気研磨法

図25の回転磁界を発生する各コイルを二分割し、磁極、鉄心、円形ヨークを設けて研磨装置を構成した（図26、図27）。回転磁界成分と直流静磁界成分の割合によって（I）～（IV）の励磁回路を用いた。実験結果を図28に示す。回路（I）は回転磁界成分のみ、回路（IV）は直流静磁界成分のみ、回路（II）と（III）はその中間で（II）の方が回転磁界

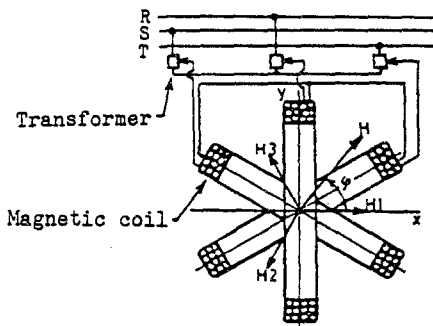


図25 回転磁界の発生

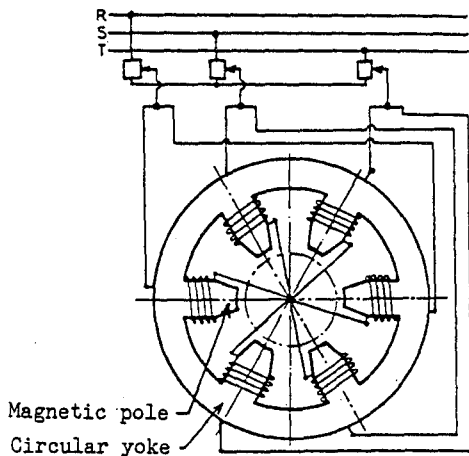
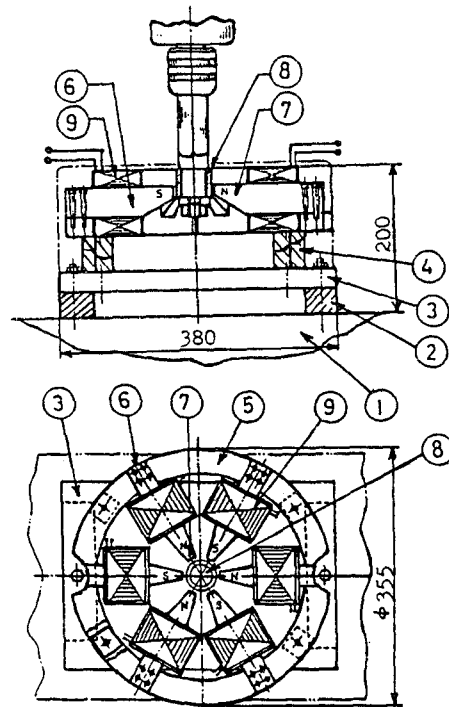


図26 回転磁界利用磁気研磨法の原理



- | | |
|---------------------|-----------------|
| 1:Table | 6:Magnetic core |
| 2:Magnetic isolator | 7:Magnetic pole |
| 3:Base | 8:Workpiece |
| 4:Magnetic isolator | 9:Coil |
| 5:Circular yoke | |

図27 回転磁界利用磁気研磨装置

成分が大きい。工作物と回転磁界との回転方向の差異は見られず(白印：同方向, 黒印：逆方向), 研磨量は回路(I) > (II) > (III) > (IV) の順になること, 自由回転するSS41材丸棒の摩擦トルクは, 逆に, 回路(IV) > (III) > (II) > (I) の順になることがわかった(図29)。静磁界での磁性研磨材の挙動は静的であるが, 回転移動磁界では動的に挙動し, 攪拌作用と振動運動の助長により研磨量が増大すること, このときの表面粗さは梨地面で粗いことを明らかにした。

そこで, 前加工面除去過程では回路(I)の回転磁界により加工能率の向上を, 次に, 回路(IV)の静磁界により表面の平滑化を実現できる高能率磁気研磨加工法を創案した

(図30: ○印は静磁界のみ, ●印は回転磁界のみ, ⊙印は回転磁界(t_1)と静磁界(t_2)の組合せ)。

[2] 内面, 球面, 自由曲面, 円管内面の磁気研磨

内筒外面の磁気研磨法的应用として, 円筒内面の磁気研磨(図31), 焼入れ鋼製ボールバルブのような球面の磁気研磨(図32), 図33のような球面(凸面及び凹面)の磁気研磨, さらに, 自由曲面の磁気研磨(図34)などが可能であることが明らかにした。また, 図35のように円管外面側にN-S磁極を設置するだけで円管内面の磁気研磨法が実現でき, 入口の狭い, 工具が入りにくい円管内面の平滑加工が可能であることを明らかにした(図36)。

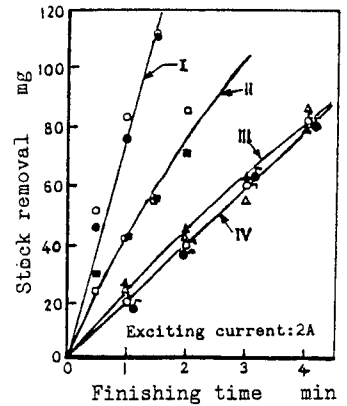


図28 研磨量と研磨時間の関係

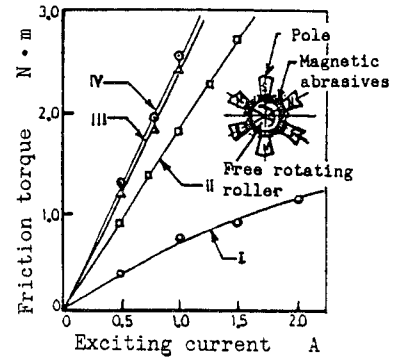


図29 摩擦トルクと励磁電流の関係

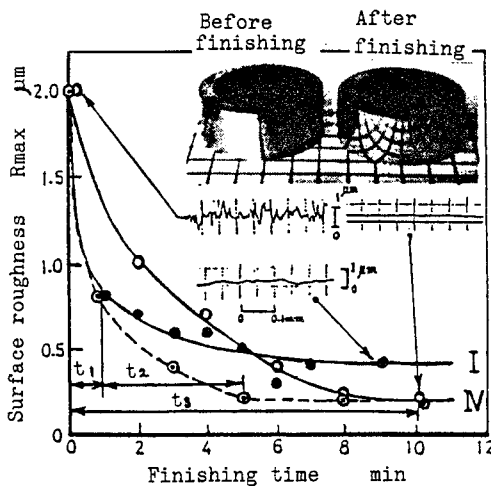


図30 表面粗さと研磨時間の関係

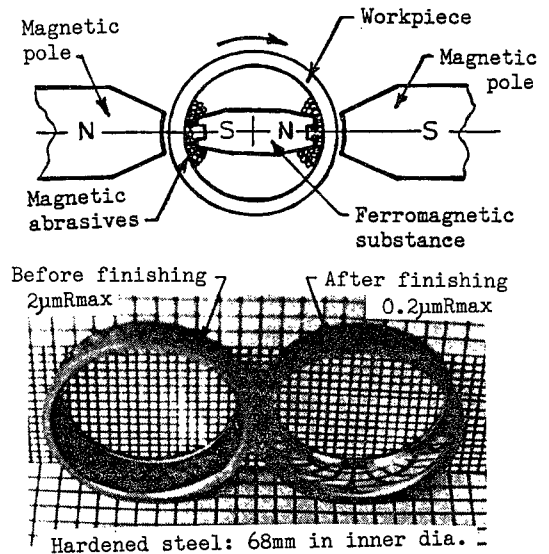


図31 内面の磁気研磨

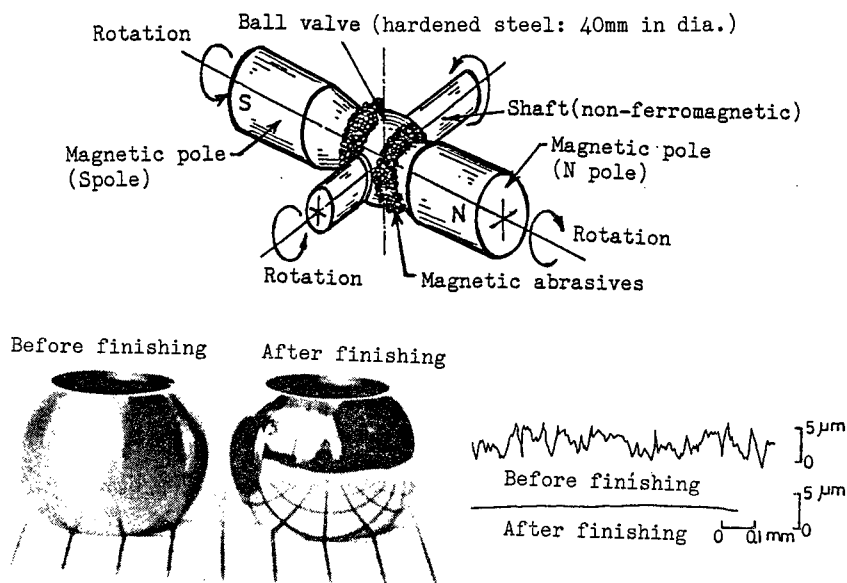


図32 球面の磁気研磨

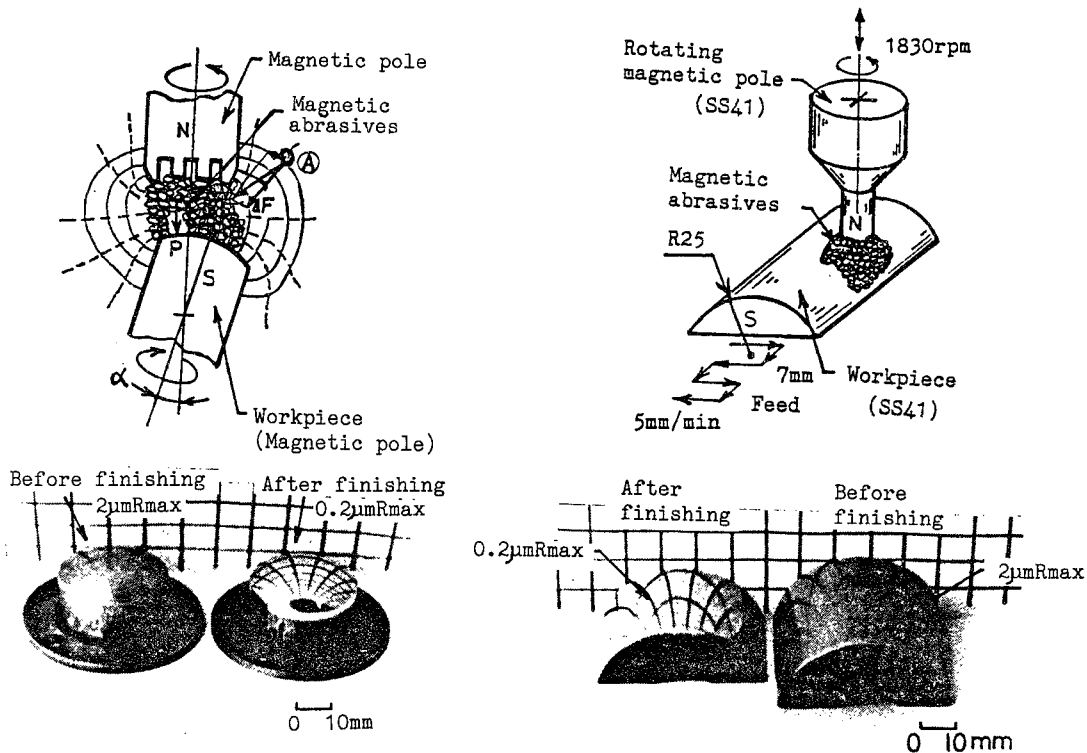


図33 球面の磁気研磨

図34 自由曲面の磁気研磨

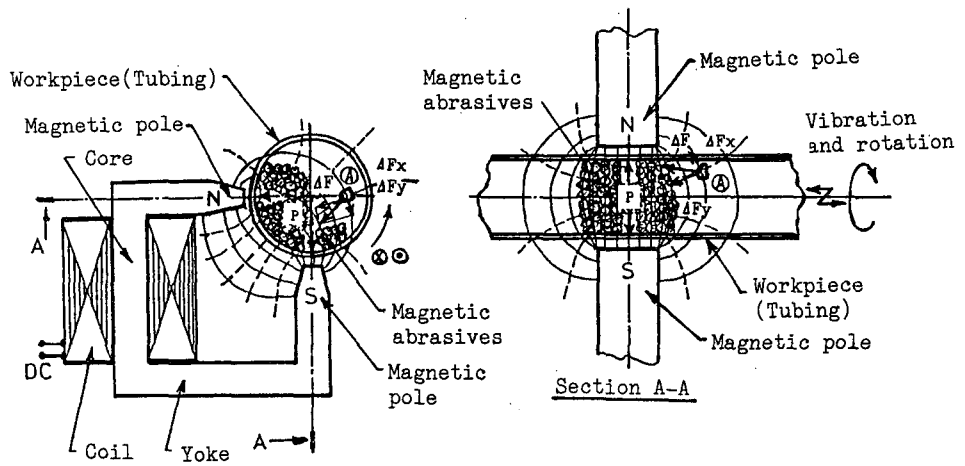


図35 円管内面の磁気研磨法

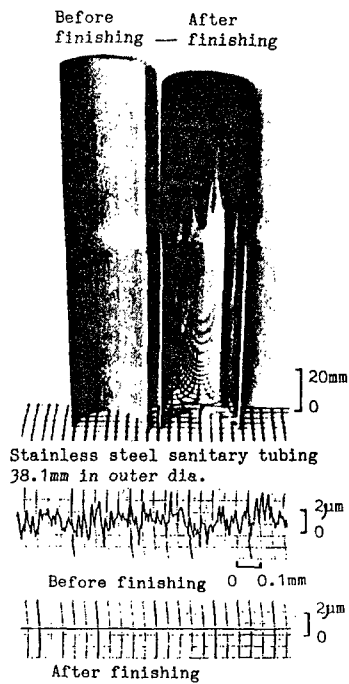


図36 円管内面の磁気研磨実験結果

第8章 結 論

本章では、本研究によって得られた結果を総括して述べている。

審 査 結 果 の 要 旨

磁気研磨法とは、強磁性体（鉄）と酸化アルミニウム等の研磨材から構成される磁性研磨材を用い、磁界の作用を利用して部品の表面仕上を行う新しい加工法であり、これまで系統的な研究は全く行われていない。本論文はこの磁気研磨法について、加工機構、加工特性の解明と、加工装置の開発に関する成果をまとめたもので全編 8 章よりなる。

第 1 章は緒論である。

第 2 章では、磁性研磨材の研磨圧力について考察している。すなわち N－S 磁極間に磁性研磨材粒子を充填すると、磁力線にそって粒子がブラシ状に整列し（これを磁気研磨ブラシとよぶ）、この磁気研磨ブラシ先端粒子の研磨圧力は、磁束密度、鉄の含有容積率、鉄の比透磁率に関係し、粒径や加工間隙には無関係であることを理論的、実験的に明らかにしている。これは非常に有用な知見である。

第 3 章では、磁気研磨装置の主要部分をしめる磁場発生装置の磁気回路の設計法を提案し、この方法で試作した装置において設計通りの磁束密度が得られたことを示している。

第 4 章では、磁気研磨法で得られる研磨量と表面粗さに及ぼす加工諸因子、すなわち研磨圧力、粒径、工作物硬さ、加工距離などの影響を実験的に明らかにしている。

第 5 章では、磁気研磨法で得られる研磨量と表面粗さについて理論的な考察を加えている。すなわち磁気研磨ブラシは研磨抵抗を受けると変形することを考慮し、研磨圧力による磁性研磨材粒子の工作物への圧入を基にして研磨量、表面粗さに関する理論式を導き、その定性的な傾向は第 4 章の実験結果とよく一致することを示している。

第 6 章では、工作物の形状誤差（真円度、円筒度）の改善条件を解析的に考察し、磁気研磨法によりこれら形状精度を著しく向上できることを示している。

第 7 章では、各種工業部品の表面研磨に磁気研磨法を応用する場合の装置の開発とその加工特性について述べている。これは実用上有用な知見である。

第 8 章は結論である。

以上要するに本論文は、新しい加工法である磁気研磨法について加工機構の解明を行い、この研磨法が各種工業部品の表面仕上に非常に有用であることを明らかにしたもので、精密工学ならびに精密工業の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。